

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСКОНТАКТНЫХ ДАТЧИКОВ С ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТИПА В ФАЗОХРОНОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Калмыков Ал.А., Поляков С.О.

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина
ул. Мира, 19, Екатеринбург, Свердловской обл., 620002, Россия
тел.: (343) 3754781, e-mail: zeppelinlz13@gmail.com

Аннотация — В статье рассматриваются особенности применения бесконтактных датчиков с чувствительным элементом трансформаторного типа в фазохронометрических измерительных системах. Рассмотрены основные преимущества и недостатки датчиков подобного типа. Проанализирован характер их взаимодействия с аддитивно нанесенными маркерами, оптимальные рабочие частоты и возможные направления улучшения их рабочих характеристик в измерительных системах.

FEATURES OF USE OF NONCONTACT SENSORS WITH A TRANSFORMER TYPE SENSITIVE ELEMENT IN THE PHASE-CHRONOMETRIC MEASURING SYSTEMS¹

Kalmykov Al.A., Polyakov S.O.

Ural Federal University named after First President of Russia B.N. Yeltsin
19, Mira Str., Yekaterinburg, Sverdlovsk reg., 620002, Russian Federation
Ph.: (343) 3754781, e-mail: zeppelinlz13@gmail.com

Abstract — In article features of use of noncontact sensors with a transformer type sensitive element in the phase-chronometric measuring systems are considered. Primary benefits and shortcomings of sensors of this kind are considered. Nature of their interaction is analyzed with it is additive put markers, optimum working frequencies and the possible directions of improving of their operating characteristics in measuring systems.

I. Введение

Важнейшей задачей в настоящее время становится обеспечение надежной и эффективной работы промышленных предприятий и целых отраслей. Один из способов — внедрение универсальных систем мониторинга, позволяющих не только оценивать состояние промышленных агрегатов и предотвращать аварийные ситуации, но и на основании измерений непрерывно поддерживать рабочие параметры в оптимальных диапазонах.

Одной из важнейших эксплуатационных характеристик газоперекачивающего агрегата является его надежность. Под понятием надежность агрегата понимается его свойство выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортировки [2].

Одним из важнейших элементов бесконтактной системы мониторинга является датчик, а если быть более точным — единой системы «датчик-маркер». Важность комплексного подхода в данном вопросе объясняется тем, что эффективность системы обеспечивается как конструкцией датчика, так и соответствующим маркером [1].

Одной из важнейших задач при разработке бесконтактной измерительной системы является разработка комплекса «датчик-метка». В данной работе рассматривается бесконтактный датчик с чувствительным элементом трансформаторного типа.

II. Основная часть

Трансформаторный вихретоковый чувствительный элемент (ВТЧЭ) содержит две пары катушек, расположенные таким образом, что в каждой паре имеется достаточно сильная взаимоиндуктивная связь, а между парами связь пренебрежительно мала. Измерительная обмотка включена в выходную цепь, а питающая — в генераторную, в соответствии со схемой на рисунке 1. Одна катушка из каждой пары подключена к генератору переменного тока, а вторые катушки включены встречно для компенсации начальной ЭДС (рисунок 1).

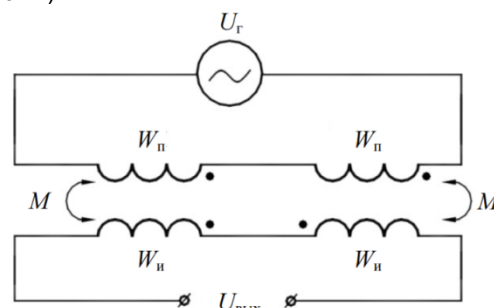


Рисунок 1. Схема трансформаторного ВТЧЭ

При приближении катушек к проводящему телу выходное напряжение описывается следующей формулой:

$$U_{\text{вых}} / U_{\Gamma} = -z_{\text{вн}}(W_{\text{и}} / W_{\text{н}})I_1 / z_0 I_0 = -z_{\text{вн}} / z_0 (W_{\text{и}} / W_{\text{н}}), \quad (1)$$

где $W_{\text{и}}$, $W_{\text{н}}$ — соответственно число витков измерительной и питающей обмоток в одной паре; I_0 и I_1 — токи в питающей и измерительной обмотках [3].

Так как разработка окончательной конструкции датчика не является целью данной работы, конструкция классического трансформаторного

ВТЧЭ была несколько упрощена – исключены из схемы катушки для компенсации начальной ЭДС. Так как они не влияют на степень изменения выходного сигнала, а лишь позволяют нейтрализовать начальную амплитуду, это не повлияет на результаты эксперимента.

В связи с тем, что математическое моделирование в данной области исследований либо не дает достоверный результат, либо чрезвычайно трудоемко в осуществлении, было принято решение проверить все необходимые детали концепции на практике.

Основную ценность представляет экспериментальное исследование характеристик ВТЧЭ при изменении рабочего зазора и при определении маркера. Изменение зазора – штатная ситуация, происходящая при виброперемещениях вала, которая приводит к появлению аддитивно-мультипликативной низкочастотной помехи. Определение же положения маркера – это главная задача датчика в фазохронометрической измерительной системе.

Конструктивно катушки всех испытанных ВТЧЭ были выполнены плоскими, виток к витку. Изготовление катушек осуществлялось из обмоточного провода ПЭВ-2 (диаметр по изоляции 0.6мм) на каркасе из пенополистирола. Обе обмотки (измерительная и генераторная) размещались вплотную. Такая конструкция обеспечивает максимальное подобие характеристик макетного и реального ВТЧЭ, который планируется изготавливать в виде плоской печатной катушки.

Испытательный стенд позволяет перемещать подложку с нанесенным маркером по двум осям – вдоль продольной оси датчика и перпендикулярно ей. Таким образом, можно варьировать зазор между датчиком и подложкой, а также перемещать подложку с маркером мимо датчика, имитируя прохождение маркера во время работы системы.

При испытаниях экспериментального ВТЧЭ с использованием трансформаторной схемы, для его запитки использовался высокочастотный генератор Г4-158, а измерительная обмотка подключалась к осциллографу LeCroy Wavejet 312. Схема подключения представлена на рисунке 4.

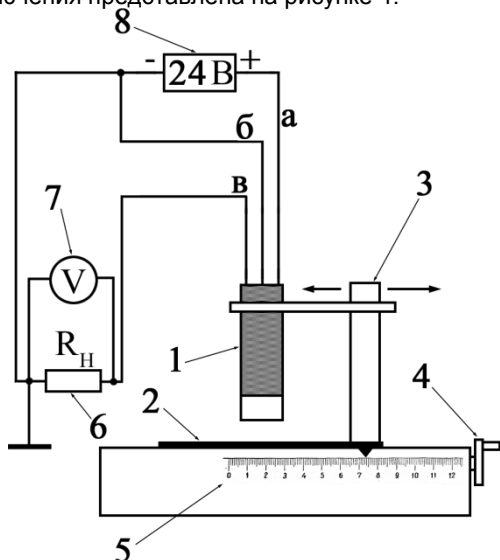


Рисунок 2. – Схема стенда для изучения характеристики отклика датчика на маркер

Цифрами на рисунке 2 обозначены: 1 – ВТЧЭ, 2 – металлическая пластина, 3 – кронштейн, 4 –

рукоятка механизма продольного перемещения, 5 – измерительная линейка, 6 – нагрузочное сопротивление R_H , 7 – вольтметр, 8 – источник питания.

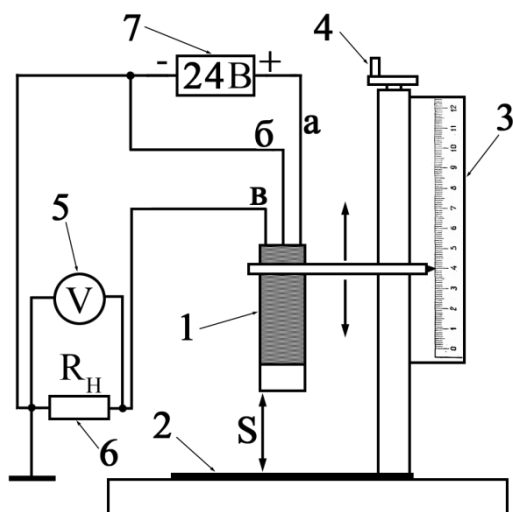


Рисунок 3. – Схема стенда для получения зависимости выходного сигнала от расстояния между датчиком и объектом

Цифрами на рисунке 3 обозначены: 1 – ВТЧЭ, 2 – металлическая пластина, 3 – измерительная линейка, 4 – рукоятка подъемного механизма, 5 – вольтметр, 6 – нагрузочное сопротивление R_H , 7 – источник питания.

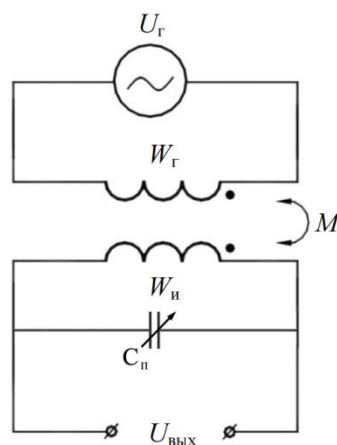


Рисунок 4. – Схема для изучения характеристик трансформаторного ВТЧЭ.

В цепь измерительной обмотки был включен подстроечный конденсатор C_p для того, чтобы настраивать полученный колебательный контур в резонанс. Таким образом, значительно повышается добротность системы, следовательно, снижается возможное взаимное влияние близкорасположенных датчиков, повышается чувствительность.

В результате проведения экспериментов получены зависимости величины напряжения на измерительной обмотке от зазора между датчиком и подложкой, реакция датчика на маркер, проведен анализ его частотных характеристик.

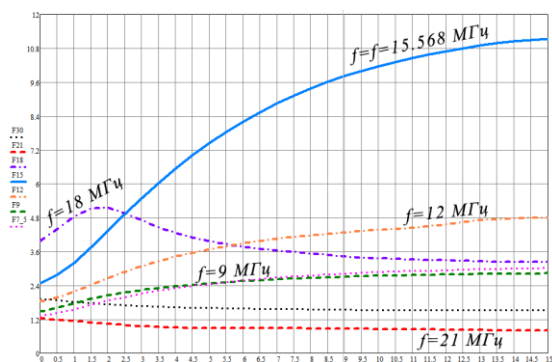


Рисунок 5. – Зависимость амплитуды напряжения на измерительной обмотке от расстояния для разных частот.

Резонансная частота для данного датчика составила 15.568 МГц. Можно увидеть, что при изменении рабочего зазора на резонансной частоте четко видна зависимость выходного сигнала от расстояния.

При этом стоит также отметить, что при отклонении частоты возбуждения от резонансной частоты контура в цепи измерительной катушки чувствительность резко падает. Кроме того, на частоте 18 МГц, которая незначительно выше резонансной, наблюдалась тенденция, схожая с характеристикой на резонансной частоте. Это объясняется тем, что при внесении проводящих объектов в зону контроля (а подложка в этом случае и будет объектом контроля) уменьшается индуктивность и генераторной, и измерительной катушки, что приводит к увеличению частоты резонанса системы. При удалении же подложки от датчика индуктивность растет, а эффективность вновь сильно снижается.

Исследования взаимодействия датчика с маркерами производились на стальной подложке с медным маркером. Такой выбор обусловлен тем, что эта пара материалов обладает наибольшей разницей в проводимости, что даст наиболее четкий результат.

Кроме того, значительную важность представляет исследование датчика, в состав которого включен экран. Экранирование может полностью исключить влияние объектов, находящихся на обратной стороне датчика, что значительно облегчит разработку конструкции кластеров датчиков для реальных агрегатов в дальнейшем. Конструкция датчика с экраном и без него представлена на рисунке 6.

В экспериментах также производилась расстройка датчика по дальности. Под определением «расстройка» в данном контексте понимается отклонение от того положения, в котором был настроен резонанс. Полученные характеристики представлены на рисунке 7.

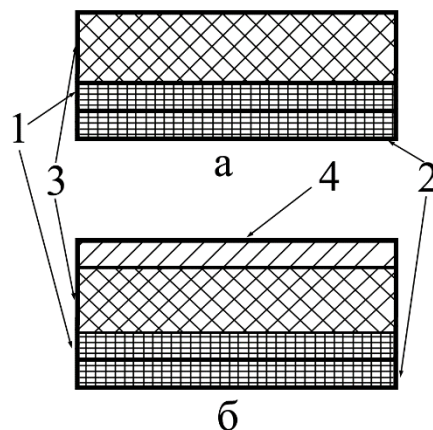


Рисунок 6. – Схематическое изображение трансформаторного ВТЧЭ, а – без экрана, б – с экраном.

На рисунке 6 цифрами обозначены:
1 – генераторные катушки, 2 – измерительные катушки, 3 – диэлектрическое основание, 4 – экран.

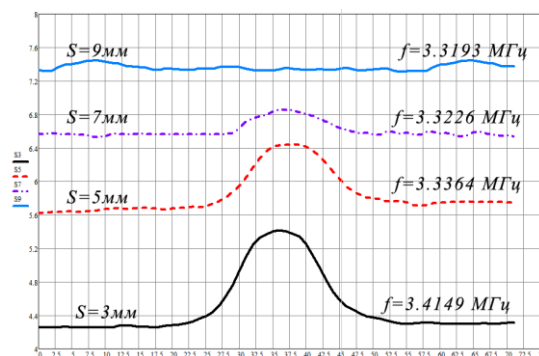


Рисунок 7. – Обнаружение метки при поддержании резонанса.

Как можно увидеть, при меньшем зазоре индуктивность датчика уменьшается, что вызывает рост резонансной частоты. С увеличением зазора резонансная частота падает, так как степень взаимодействия датчика с подложкой уменьшается, и при зазоре в 9 мм датчик уже не различает маркер.

Также следует отметить тот факт, что чувствительность датчика к изменению проводимости тем выше, чем ниже его рабочая частота. Однако исполнение датчика в виде печатных катушек накладывает значительные ограничения на частотный диапазон. При разумных размерах датчика (диаметр катушек 30 мм) индуктивность его измерительной катушки при намотке виток к витку составляет около 10-12 мкГн. В таком случае обеспечить резонанс с сохранением высокой добротности и чувствительности можно лишь на сравнительно высоких частотах (единицы мегагерц). Этот факт вынуждает искать компромисс между диаметром датчика, его чувствительностью и возможностью обеспечения его компактного размера.

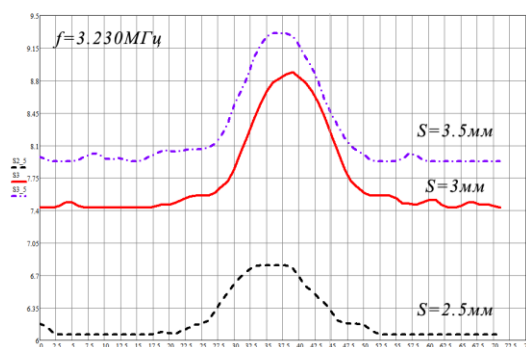


Рисунок 8. – Обнаружение метки при сохранении частоты с разными зазорами, ВТЧЭ без экрана.

На рисунке 8 можно увидеть влияние изменения рабочего зазора при поддержании частоты. При уменьшении расстояния влияние подложки существенно больше – это связано с характером взаимодействия ВТЧЭ и металлических объектов. При этом в обоих случаях без поддержания резонансной частоты наблюдается уменьшение эффективности, однако в случае реального изменения зазора в рабочем состоянии в диапазоне 0.05...0.1 мм этот эффект не окажет существенного влияния. Далее приводятся результаты экспериментов с применением экранированного ВТЧЭ.

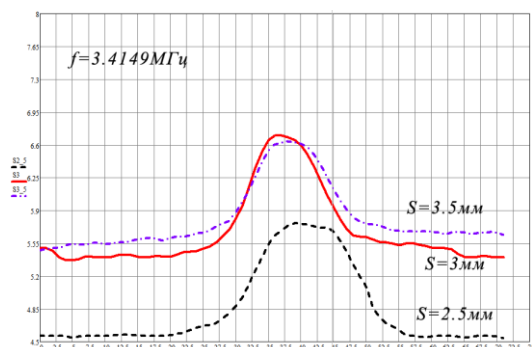


Рисунок 9. – Обнаружение метки при сохранении частоты с разными зазорами, ВТЧЭ с экраном.

Очевидно, что добавление экрана снижает индуктивность катушек, что приводит к повышению резонансной частоты, а также уменьшает влияние изменения величины рабочего зазора. Это объясняется некоторым снижением добротности системы. Снижение добротности видно также по уменьшению амплитуды для всех вариантов зазоров. Подробный график амплитудно-частотных характеристик экранированного и неэкранированного ВТЧЭ приведен на рисунке 10.

Испытание проводилось в свободном пространстве, без подложки, чтобы оценить собственную АЧХ системы без влияния внешних объектов. Датчик настраивался в резонанс с помощью изменения частоты генератора Г4-158, затем частота менялась в диапазоне от $\frac{1}{4} f_0$ до $4 f_0$.

По результатам можно увидеть, что экран несколько снижает добротность (в данном случае максимум АЧХ для экранированного ВТЧЭ оказался на 4% меньше), а также вызывает увеличение резонансной частоты в связи со снижением индуктивности.

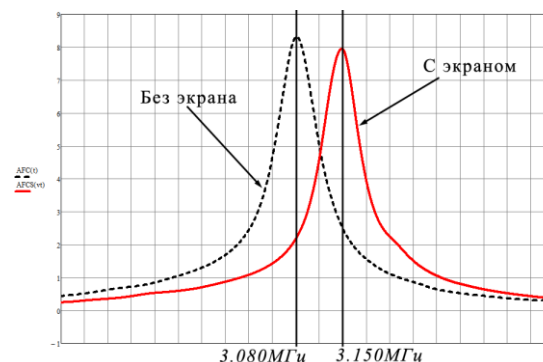


Рисунок 10. – АЧХ экранированного и неэкранированного ВТЧЭ.

В целом, так как использование экрана позволяет полностью избавиться от непредсказуемого влияния на выходной сигнал объектов позади датчиков, а также уменьшает влияние рабочего зазора ввиду снижения добротности, его применение следует считать однозначно положительным конструктивным решением.

III. Заключение

Трансформаторный бесконтактный датчик пригоден для использования в качестве датчика фазохронометрической измерительной системы

Оптимальная рабочая частота находится в диапазоне 3...3.5 МГц.

Метка однозначно определяется при рабочих зазорах до 7 мм.

Использование экрана несколько снижает добротность (в данном случае максимум АЧХ с экраном оказался на 4% меньше), а также вызывает увеличение резонансной частоты в связи со снижением индуктивности, что снижает влияние зазора на показания датчика.

Оптимальные частотные диапазоны для задачи определения рабочего зазора (10-20 МГц) и для задачи обнаружения маркеров (1-5 МГц).

Так как итоговая избирательность системы получилась довольно высокой, возможно использование нескольких датчиков в кластере, не опасаясь взаимного влияния. Кроме того, возможно одновременное использование близкорасположенных излучателей (или даже одного излучателя) для одновременного получения информации, как о прохождении маркеров, так и о зазоре между валом и датчиком. Это возможно благодаря отсутствию у ВТЧЭ, настроенного в верхнем диапазоне (десятки мегагерц), чувствительности к прохождению маркеров.

IV. Литература

- [1] Kalmykov A.I., Kulikov V.A., Polyakov S.O. Linear approximation in phase-chronometric signal processing in torque measurement system of gas pumping plant // 2014 24th Int. Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2014), Sevastopol, 2014, pp. 944-945.
- [2] S.V. Porshnev, V.A. Stepanenko, A.A. Kalmykov, V.A. Vladimirov, S.N. Dyadkov. Diagnosis of gas pumping plant based on the analysis of technological information. Ekaterinburg: Ural Branch of RAS, 2007. ISBN 5-7691-1894-6.
- [3] Gerasimov V.G., Klyuev V.V., Shaternikov V.E. Methods and devices of electromagnetic monitoring / edited by V.E. Shaternikov. - M.: Publishing House "Spectrum", 2010. - 256 p.